不同界面状态的交联聚乙烯/三元乙丙橡胶双层介质电导特性研究

易姝慧　王亚林　吴建东　尹　毅

（上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系　上海　200240）

摘要：本文测量了在 30 ～ 90℃，1 ～ 19kV/mm 下三种接触方式的交联聚乙烯/三元乙丙橡胶双层介质电导特性，分析了电场、界面以及温度对双层介质电导的影响机理。研究表明：随着电场升高，三种双层介质电导率的电场依赖性均随之升高；热压接触式双层介质电导率的温度敏感性强于其他两种物理接触界面的双层介质，温度对化学界面的影响比对物理界面的影响更大。双层介质电导存在类似半导体物理中 PN 结的极性现象，热压式接触双层介质电导率极性效应与另外两种双层介质相反。界面状态对双层介质的电导特性有着明显的影响。

关键词：交联聚乙烯　乙丙橡胶　电导率　温度　界面

中图分类号：TM215

Research on Conduction Characteristics of Double-layered XLPE/EPDM with Different Interface States

Yi Shuhui　Wang Yalin　Wu Jiandong　Yin Yi

（School of Electronic, Information and Electrical Engineering

Shanghai Jiao Tong University　Shanghai　200240　China）

Abstract: In this paper, the conductivity of double-layered XLPE/EPDM with three interface conditions were measured at 30~90℃ and the measuring electric field is from 1kV/mm to 19kV/mm. The influence factors of electric field, interface and temperature on conduction characteristics of double-layered dielectrics were analyzed. The results show that the electric field dependence of the conductivity of the three double-layered dielectrics increases as the electric field increases. The temperature sensitivity of the hot-contact double-layered dielectric conductivity is stronger than that of the other two dielectrics with physical interface, which means the influence of temperature on the conductivity of chemical interface is greater than that of physical interface. Besides, the double-layered dielectric conductivity has a polar effect similar to PN junction and polar effect of the conductivity of hot-contact double-layered dielectric is opposite to that of the other two double-layered dielectrics, which manifests the interface condition largely affects conduction characteristics of double-layered dielectrics.

Keywords: Cross-linked polyethylene, Ethylene-propylene-diene monomer, conductivity, temperature, interface



易姝慧　女　1994年生，工学硕士，主要研究方向为聚合物绝缘材料性能测试和结构改良。



王亚林　男　1992年生，博士后，主要研究方向为聚合物电介质介电特性和电力设备状态检测方面。

收稿日期：2018-08-03

国家重点研发计划（2016YFB0900701）。

1 引言

交联聚乙烯（Cross-Linked Polyethylene，XLPE）和三元乙丙橡胶（Ethylene-Propylene-Diene Monomer，EPDM）由于击穿场强高，同时还具有较强的耐酸碱性和耐油性，优异的机械特性和耐热性能，常被分别用作高压直流电缆本体和附件的绝缘材料[1-4]。在实际运行过程中，直流电缆系统故障常常并不在电缆本体发生而是出现在电缆附件处。高压直流电缆附件中由于存在 XLPE/EPDM 胶构成的复合绝缘结构，其界面处比材料本体更容易积累电荷，引起局部电场的畸变，从而使得绝缘更加容易失效。此外，在直流电压下，复合绝缘结构的电场分布以及绝缘设计除了受界面状态以及空间电荷的影响外，绝缘随电场和温度而变化的非线性电导也对其影响较大。不同电介质材料的电导特性随电场和温度的变化而变化的规律和机理各不相同，从而使得电缆附件的电场计算更加复杂，增加了电缆附件绝缘设计的难度。

电缆附件内部电场分布的复杂性，使得附件绝缘材料的研究以及绝缘结构的设计都远远落后于电缆本体，限制了高压直流电缆的发展，电缆附件中复合绝缘结构的电场分布规律成为了亟待解决的关键问题。对于双层介质的界面电荷行为，近年来已有国内外学者展开了相关的研究，S. Delpino 等研究了高压直流聚合物绝缘系统中物理界面和化学界面处的空间电荷积聚状况，发现物理界面比化学界面更容易积累电荷，且当电场极性变化时，相同界面状态的双层介质界面电荷量存在差异[5]。吕亮等测量了涂抹硅脂前后硅橡胶/乙丙橡胶双层介质界面处的空间电荷分布情况，发现双层介质界面处空间电荷的形成与介质中的载流子迁移方向、电极和介质材料均有关，且涂抹硅脂后界面处的空间电荷积累有效降低[6]。

上述相关研究中，绝大部分学者都是通过空间电荷对双层介质进行了相关的研究，双层介质电导特性变化的相关研究较少。电导率的变化可以揭示试样中载流子的动态输运特性的变化，对直流电场下介质内部的微观特性变化进行评估；且由于直流电场下电缆附件绝缘处的电场是由电导率所决定的，因此需要研究双层介质的电导率在不同电场和温度下的变化规律，从而有助于电缆附件的绝缘设计。本文以高压直流电缆附件中的 XLPE/EPDM 双层介质为研究对象，制备了直接接触、硅脂接触以及热压接触三种不同接触方式的双层介质，测量了试样在不同电场和温度下的电导特性，研究了温度、电场以及界面状态对双层介质电导特性的影响。

2 实验方法

2.1 试样制备

本文所使用的 XLPE 和 EPDM 试样为专供高压直流电缆和附件所使用的商业化绝缘材料。制备 XLPE 片状试样的原料为某电缆绝缘料生产企业提供的交联聚乙烯粒料，为了消除颗粒与颗粒之间的界面，XLPE 粒料需要先在 110℃下于转矩流变仪中密炼 5min，然后将密炼后的材料放于平板硫化机上进行热压交联。平板硫化机预热至 110℃后，将材料放于平板硫化机中逐渐加压，最终升至 20MPa 后，再将温度升高至 180℃并保持温度和压力 15min，使其充分交联；最后保持 20MPa 的压力，以 1℃ /min 的速率降至室温，制成的 XLPE 试样厚度约为 80μm。EPDM 片状试样由某电缆附件生产厂家提供，厚度约为 410μm。

直接接触式双层试样为 XLPE 与 EPDM 片状试样在常温下直接紧压，不做其他处理；硅脂接触式双层试样需要在 XLPE 与 EPDM 试样接触面上涂上硅脂；热压接触式双层试样为 XLPE 与 EPDM 试样在 110℃、5 ~ 10MPa 下压紧后，保持压力并逐渐降至室温压制成型的试样。

为了减少交联副产物对实验结果的影响以及消除压制过程中残余的应力，在进行相关实验前还需要对试样进行预处理：将制备好的试样放置于真空烘箱中短路 24h，温度为 60℃，真空度 10^{-2}Pa，而后以 0.1℃ /min 的速率降至室温。

2.2 高电场电导实验

本文的电导测量实验采用实验室自主研发的高电场电导测量系统，如图 1 所示。高电场电导测量

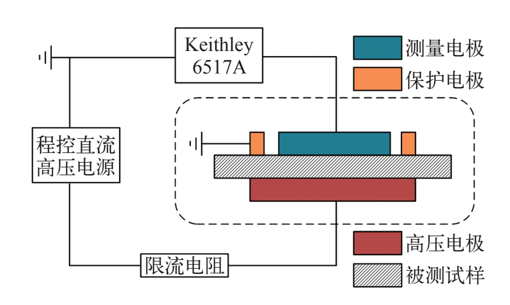


图 1 高电场电导测量系统结构图

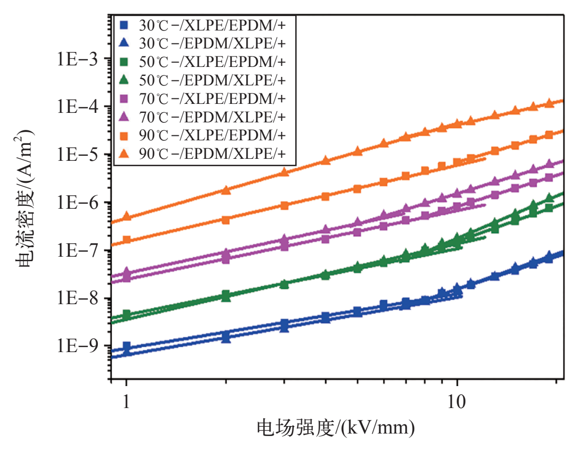
Fig.1 Schematic diagram of high-field conductivity measuring system

系统由高压直流电源、控温系统、高精度电流表以及三电极电流测量系统组成。高压直流电源输出的电压范围为 0 ～ 10kV，纹波系数小于 1%。控温表控温精度为 ±0.1℃。电流表采用 Keithley 6517A 型静电计，最小测量精度为 0.75×10^{-15}A。电极系统采用带保护极的三电极结构，从而消除沿面泄漏电流对测量结果的影响。

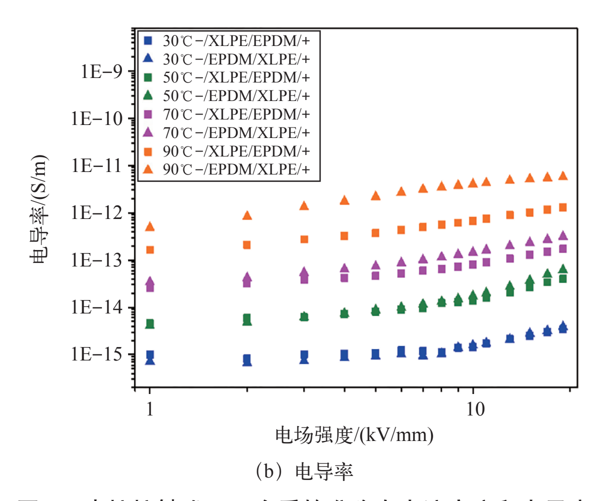
本文测量了直接接触型、硅脂接触型以及热压接触型 XLPE/EPDM 双层试样在 30℃、50℃、70℃和 90℃下的高电场电导，采用 600s 时刻的测量电流值来计算试样的准稳态电流密度和电导率。在每个温度点下，从低到高依次测量不同外施电场下的极化电流，测量电场分别为（1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、13、15、172kV/mm 和 19kV/mm。每次测量后均短路 120s，以消除上一次加压测量对下次测量的影响。对不同接触方式的双层介质，本文测量了正极性电场（–/XLPE/EPDM/+）和负极性电场（–/EPDM /XLPE/+）下双层介质的电导特性，研究电场极性对双层介质电导特性的影响。为了保证试样在进行电流测量时能达到指定温度，每个温度点下稳定 30min 后再开始测量。

3　实验结果与分析

现有的聚合物绝缘材料电导机理的相关研究中，常用空间电荷限制电流理论来对聚合物绝缘材料在较高电场下的电流特性进行描述 [7-8]，故实验结果以 lg J ～ lg E 和 lg σ ～ lg E 双对数坐标作图。图 2 ～图 4 为三种接触方式的双层介质在不同温度下随电场变化的准稳态电流密度和电导率。三种接触方式的双层试样的电流密度及电导率的变化趋势比较类似，均随温度的升高呈指数增大的趋势，在双对数坐标系随电场呈分段线性变化关系。在测量温



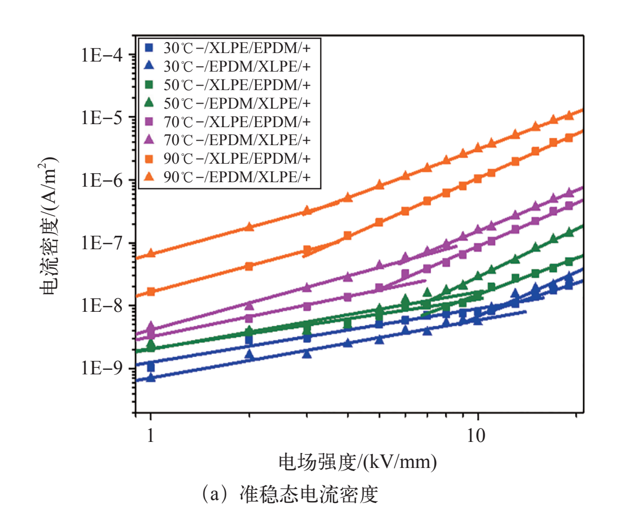
（a）准稳态电流密度



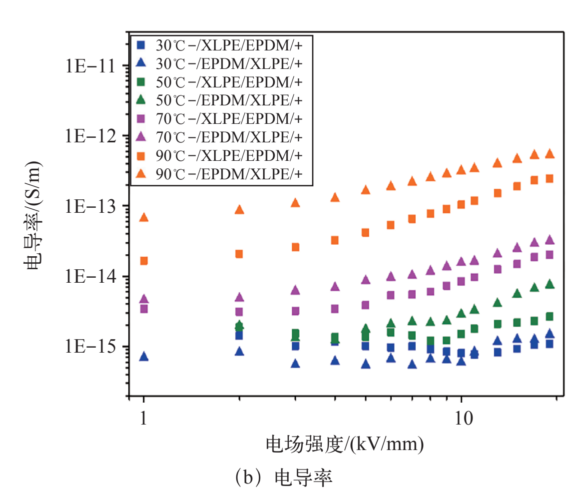
（b）电导率

图 2　直接接触式双层介质的准稳态电流密度和电导率

Fig.2　Quasi-steady currents and conductivities of direct-contact double-layered XLPE/EPDM



（a）准稳态电流密度

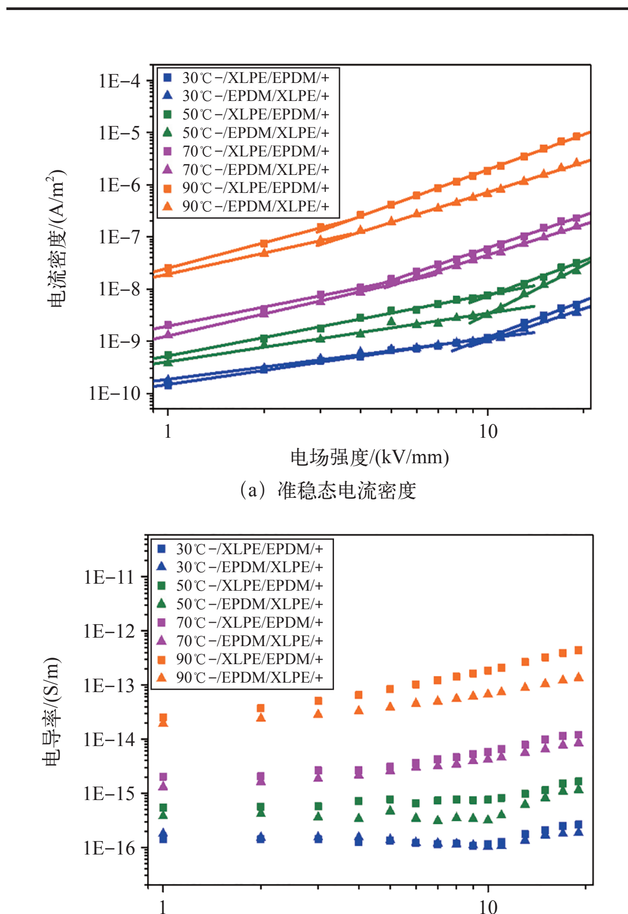


（b）电导率

图 3　硅脂接触式双层介质的准稳态电流密度和电导率

Fig.3　Quasi-steady currents and conductivities of grease-contact double-layered XLPE/EPDM

度范围内，直接接触式双层介质的电导率最大，热压接触式双层介质的电导率最小，仅在 90℃下，电场极性为 –/XLPE/EPDM/+ 时，硅脂接触式双层介



（a）准稳态电流密度

（b）电导率

图 4　热压接触式双层介质的准稳态电流密度和电导率

Fig.4　Quasi-steady currents and conductivities of hot-contact double-layered XLPE/EPDM

质的电导率在三种双层介质中出现了最小值。此外，随着外施电场的增强及温度的升高，双层试样在不同极性的电场下准稳态电流和电导率不相等，即存在极性效应。对直接接触式双层试样以及硅脂接触式双层试样，电场极性为 –/EPDM/XLPE/+ 时试样的电流密度及电导率大于电场极性为 –/XLPE/EPDM/+ 的试样，对热压接触式双层试样，其变化规律相反。

对电流密度曲线进行分段线性拟合，其拟合曲线的斜率和阈值电场见表 1。在不同的电场极性下，不同接触方式的双层介质电流密度随电场变化的 lg J ~ lg E 的斜率均增大，低场下电流密度 J_1 的斜率小于高场下 J_2 的斜率，即在测量范围内存在电导机理的变化。电流密度随电场变化的斜率可用于表征电介质电导率的电场依赖性。随着电场升高，三种双层介质电导率的电场依赖性均随之升高，且在 50℃时，高场下直接接触式双层介质的电导率对电场强度的依赖性最强，当温度高于50℃时，硅脂接触式双层介质的电导率对电场强度的依赖性最强。当测量温度为 30℃时，第一段电流密度 J_1 的斜率约为 1，即电流密度与外施电场成正比，符合欧姆定律的描述，说明此时处于欧姆区，双层 XLPE/EPDM 试样内部参与电导行为的载流子主要为热平衡载流子。第二段电流密度 J_2 斜率变化范围为 1.71 ~ 2.33，此时双层介质的电导特性处于非欧姆区，其电流的变化受陷阱分布、载流子数量、迁移以及复合的综合影响。当测量温度较高时（> 30℃），J_1 的斜率基本上大于 1，J_2 的斜率受接触方式以及温度的不同影响较大，其变化范围为 1.92 ~ 2.34。

表 1　双层试样 J–E 曲线的斜率及阈值电场

Tab.1　Slopes and transition electric fields of the J–E curves in double-layered XLPE/EPDM

双层介质接触方式	温度/℃	斜率 XLPE(−) J_1	斜率 XLPE(−) J_2	斜率 XLPE(+) J_1	斜率 XLPE(+) J_2	阈值电场 /(kV/mm) XLPE(−) E	阈值电场 /(kV/mm) XLPE(+) E
直接接触	30	1.13	2.26	1.19	2.43	8.20	7.24
	50	1.37	2.44	1.57	2.93	7.19	8.26
	70	1.43	2.16	1.48	2.12	7.59	6.21
	90	1.58	2.03	1.97	1.58	7.18	8.28
硅脂接触	30	0.85	1.71	0.92	2.34	10.3	9.08
	50	0.81	1.93	0.92	2.52	8.66	7.12
	70	1.06	2.28	1.42	2.16	5.90	6.29
	90	1.39	2.34	1.43	1.94	3.59	3.35
热压接触	30	0.89	2.33	0.80	2.12	10.6	10.8
	50	1.17	2.25	0.93	2.86	9.90	10.2
	70	1.22	2.07	1.35	1.94	4.69	5.42
	90	1.62	2.24	1.34	1.92	3.73	4.03

4　讨论

电介质的电导特性在微观层面上来说即为载流子的输运过程，而载流子的输运特性将受到载流子的产生、迁移、入陷和脱陷以及复合行为的影响。当测量温度和电场发生变化时，载流子的密度、动能以及在介质内部迁移势垒均随之变化，从而影响载流子的输运过程。对于双层介质，由于介质中界面的存在，载流子由电极注入介质内部，将会在介质体内发生迁移并积聚到界面附近，此时界面的微观结构以及界面附近的势能分布将极大地影响到界面处的载流子迁移以及复合行为。影响双层介质中载流子输运过程的行为因素较多，且均受外施电场、

温度以及界面状态的影响。

4.1　双层介质中的电荷输运

电荷输送示意如图 5 所示。在直流电场下，根据 Maxwell-Wagner 极化理论 [9]，双层介质将在界面处产生极化电荷，当电场较低，介质与电极的接触界面处无明显载流子注入时，参与电导行为的载流子主要是热平衡载流子，双层介质的接触界面处的极化电荷产生的电场将使得双层介质中介质内部的电场按介质的电导率分布，致使两种介质之间的电流连续。当电场较高时，介质与电极的接触界面均有不同极性的载流子注入，注入的载流子在电场作用下在介质体内发生迁移，相对于在介质内部的运动而言，由于两种介质的微观结构的不同、接触的不完善以及表面态的存在，使得载流子从一种介质穿过界面进入另一介质的跃迁行为往往会更加困难，因此载流子将在界面处存在大量的积聚，即此时界面可看成一个陷阱区域或复合中心，在界面附近不同极性的载流子密度都较高，相遇发生复合或者被陷阱捕获的概率也大大增高，从而减少了参与电导行为的载流子数量；在界面处积聚的不同极性的载流子将会使界面处的电场大大增强，从而促进了载流子从一种介质跃迁到另一种介质的行为，同极性载流子的注入以及积聚都将降低介质体内的电场强度，从而降低电极处的载流子注入现象，即双层介质中的界面对电流起到了调节的作用。

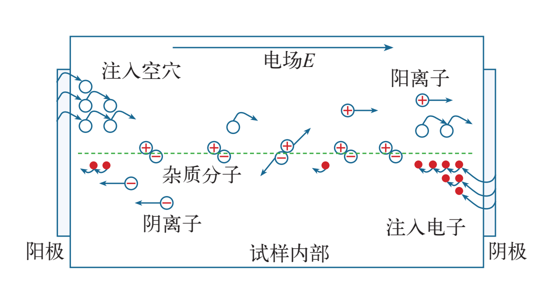


图 5　电荷输运示意图

Fig.5　Schematic of charge transportation

4.2　双层介质电导的温度敏感性

温度对电介质中载流子的注入和迁移都存在着指数级别的影响。随着温度的升高，电子所具有的热动能增加，更容易越过势垒从电极进入介质或从一种介质通过接触界面而进入另一种介质，从而使得参与电导行为的载流子数量增多。载流子以跳跃电导的机理在介质内传输的过程中，跳跃距离随着温度的上升而随之增大，即载流子的迁移速率变快，综合而言，温度的升高将会促进载流子的输运行为，提高电介质的电导率。

对于双层介质，由测量结果可知，电导率随温度也存在指数级的增长关系。选取双层介质处于不同电导区域时的电导率，作出其与温度的关系图，如图 6 ～图 8 所示。可以发现，直接接触式双层试

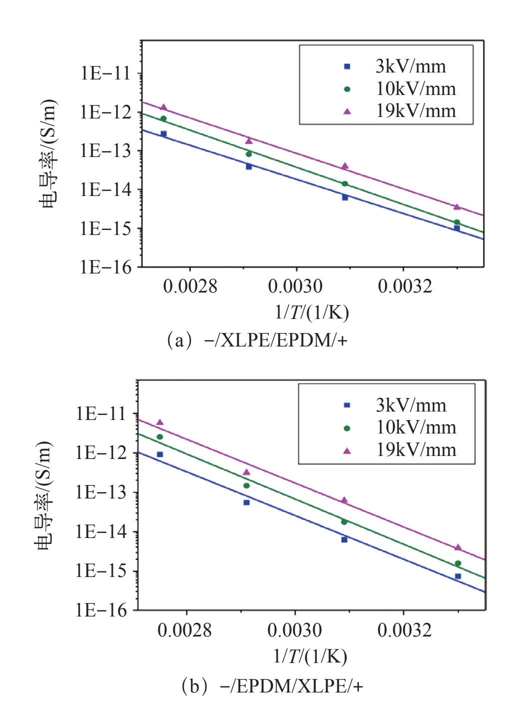


图 6　直接接触式双层介质的电导率随温度的变化规律

Fig.6　Relationship between conductivity and temperature in direct-contact double-layered XLPE/EPDM

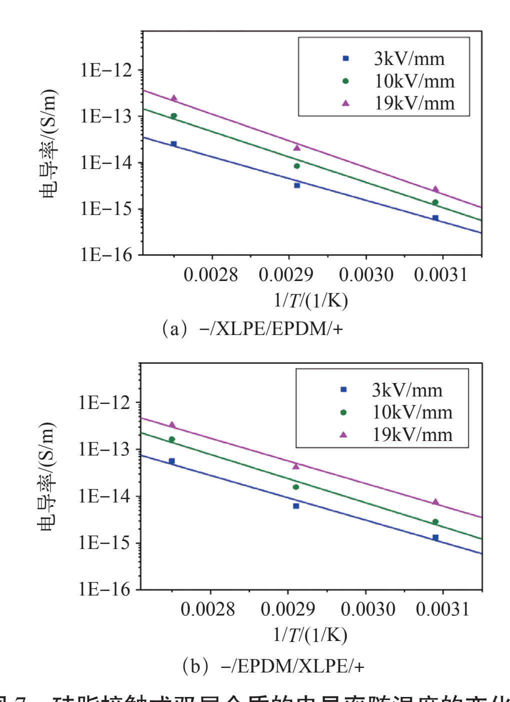


图 7　硅脂接触式双层介质的电导率随温度的变化规律

Fig.7　Relationship between conductivity and temperature in grease-contact double-layered XLPE/EPDM

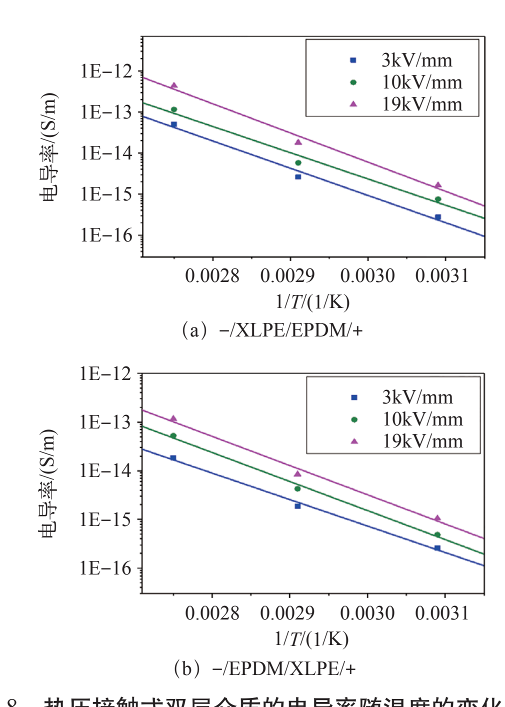


图 8　热压接触式双层介质的电导率随温度的变化规律

Fig.8　Relationship between conductivity and temperature in hot-contact double-layered XLPE/EPDM

样在 30 ～ 90℃的范围内，处于不同电导区域的电导率与温度均呈指数关系，而硅脂接触式双层试样和热压接触式双层试样在 50 ～ 90℃的范围内其电导率也与温度呈指数关系，聚合物的电导率与温度的关系与 Arrhenius 方程形式类似 [10]

$$\gamma = Ae^{-\frac{\varphi}{kT}}$$

式中，A 为常数；φ 为活化能；T 为绝对温度。式中活化能可用来表征电介质的电导率对温度的敏感性，活化能越大，表明电介质的电导率随着温度变化得更加剧烈。

不同试样的 Arrhenius 方程系数见表 2，直接接触式双层试样的活化能为 0.87 ～ 1.14eV，且极性为 −/XLPE/EPDM/+ 时试样电导率的温度敏感性弱于极性为 −/EPDM/XLPE/+ 时的双层介质；硅脂接触式双层试样电导率的活化能为 0.93 ～ 1.14eV，不同极性下双层介质的活化能仅在 19kV/mm 下有比较明显的差别，极性为 −/XLPE/EPDM/+ 时双层介质试样电导率的温度敏感性强于极性为 −/EPDM/XLPE/+ 时的双层介质试样；热压接触式双层试样电导率活化能为 1.08 ～ 1.32eV，极性为 −/XLPE/EPDM/+ 时双层介质电导率的温度敏感性强于极性为 −/EPDM/XLPE/+ 时的试样。比较三种双层介质的活化能，热压接触式双层试样的电导率温度敏感性最强，即电导率受温度的影响变化较大。

表 2　不同试样的 Arrhenius 方程系数

Tab.2　Coefficients of Arrhenius equation for different samples

类　型	电场极性	电场强度/(kV/mm)	活化能 φ/eV
直接接触式双层XLPE/EPDM	−/XLPE/EPDM/+	3	0.87
		10	0.95
		19	0.91
	−/EPDM/XLPE/+	3	1.10
		10	1.14
		19	1.10
硅脂接触式双层XLPE/EPDM	−/XLPE/EPDM/+	3	0.93
		10	1.09
		19	1.14
	−/EPDM/XLPE/+	3	0.95
		10	1.02
		19	0.96
热压接触式双层XLPE/EPDM	−/XLPE/EPDM/+	3	1.32
		10	1.27
		19	1.39
	−/EPDM/XLPE/+	3	1.08
		10	1.18
		19	1.19

对于不同接触状态的三种双层介质，电导率的温度敏感性存在差别，主要取决于温度对不同接触状态的界面的影响有所不同。热压接触式双层介质的界面处两种介质存在化学接触，接触紧密，而直接接触式和硅脂接触式界面处仅存在物理接触，且分别存在空气和硅脂的影响，故温度对化学界面的影响比对物理界面的影响更大。直接接触式双层介质与热压接触式双层介质电导率的温度敏感性受到电场极性的影响，而硅脂接触式双层介质电导率的温度敏感性在不同极性的低电场下无明显的极性效应，可能与硅脂接触式双层介质的界面中引入了硅脂有关，硅脂接触式界面对外表现出的活化能的极性将受到多种因素的影响，在低电场下无明显的规律；而硅脂接触式界面在高电场下表现出了比较明显的极性效应，其原因可能是高电场下参与电导行为的载流子数量较多，温度所产生的影响比较明显。

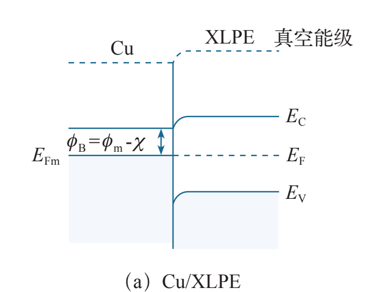
4.3　界面状态对双层介质电导的影响

电荷在电极 / 电介质接触界面以及 XLPE/ EPDM 接触界面处的注入、抽出、复合以及积聚的行为都将影响双层介质的电导特性。

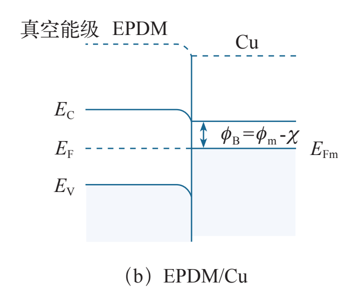
对于金属和电介质的电接触，当接触是一种真实完善的接触时，若不考虑表面态的作用，接触类型根据金属材料和电介质的功函数的不同可分为三种接触类型：中性接触、阻挡接触和欧姆接触[11-12]。当两种材料功函数相等时，电子在两种材料之间无定向的净流动，电介质的导带和价带都不会发生弯曲，这一类型的接触为中性接触。当金属的功函数大于电介质的功函数时，金属中的电子需要克服一势垒 才能进入电介质的导带中，此种类型的接触对电子来说为阻挡接触。当金属的功函数小于电介质的功函数时，金属中的电子向电介质中流动，此种接触类型为欧姆接触。

对于本文所研究的铜电极、XLPE 和 EPDM 材料，假设三种材料铜的功函数最小，EPDM 的功函数次之，XLPE 的功函数最大，并且这种假设很有可能成立。由接触能带理论可知，铜电极与 XLPE 的接触以及铜电极与 EPDM 的接触对电子来说均为欧姆接触，即电极与两种电介质的接触始终趋向于将电子注入到电介质中。而对于 XLPE 和 EPDM 之间的接触，由于两者均为电介质，其费米能级并不是固定不变的，所在的位置会随着介质中电子和空穴数量的变化而不断变化，但当 XLPE 和 EPDM 接触时，由于两种电介质的功函数的不同，会始终趋向于将 EPDM 中的电子注入到 XLPE 中，将 XLPE 中的空穴注入到 EPDM 中，此时接触界面间也会存在电荷的流动，两种电介质的费米能级都将发生变化，直到变为一致，参考异质 PN 结的能级图，可画出 XLPE/EPDM 的接触能级图，如图 9 所示。

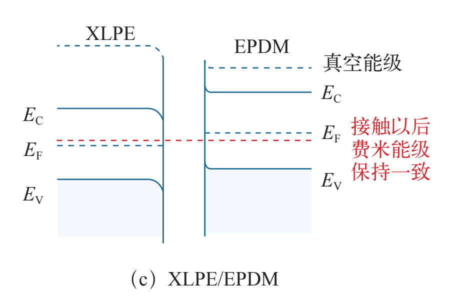
对 XLPE/EPDM 接触界面，若认为接触是真实而完善的，且不考虑表面态的影响，由于两者功函



（a）Cu/XLPE



（b）EPDM/Cu



（c）XLPE/EPDM

图 9　不同材料接触时的能带图形

Fig.9　Energy-band graphics of the contact between different materials

数的不同，电子更容易由 EPDM 流入到 XLPE 中，空穴更容易由 XLPE 流入到 EPDM 中，当外施电场极性为 –/EPDM/XLPE/+ 时，电场会降低势垒提供更高的空间电荷限制电流；而当外施电场极性为 –/XLPE/EPDM/+ 时，来自 XLPE 中的电子向 EPDM 流动时，会受到势垒范围内存在的电子的限制，势垒可认为是自由载流子的耗尽层，即势垒内部的阻抗会高于势垒外部，界面处的电流密度会比电介质内部的电流小，即此时的电导为电极限制，电流密度会小于电场极性为 –/EPDM/XLPE/+ 时的电流密度，即类似于 PN 结，在施加正压和反压时的电流密度有较大差异，存在极性效应。

5　结论

本文主要研究了不同温度和不同电场下 XLPE/EPDM 双层电导行为。通过分析电场、温度以及界面对双层介质电导率的影响，得到以下结论：

（1）在双对数坐标下，双层介质的电导率随电场存在分段线性变化关系，且随着电场升高，三种双层介质电导率的电场依赖性均随之升高。

（2）双层试样的电导率随温度呈指数增长，其关系与 Arrhenius 方程形式类似，热压接触式双层介质电导率的温度敏感性强于其他两种物理接触界面的双层介质，温度对化学界面的影响比对物理界面的影响更大。

（3）对于不同接触状态的双层电介质，在不同电场极性下其电导率存在差异，且随着温度以及电场的升高差异逐渐增大。这一类似于 PN 结的极性效应可能是由于 XLPE 与 EPDM 功函数的不同导致的。热压式接触双层介质电导率极性效应与另外两种双层介质相反。

参考文献

[1]　Wang Y, Li G, Wu J, et al. Effect of temperature

on space charge detrapping and periodic grounded DC tree in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3704-3711.

[2] Khalil M S. International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6): 35-47.

[3] Hanley T L, Burford R P, Fleming R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(1): 13-24.

[4] Ruter F, Parpal J L, Swingler S G. A review of HVDC extruded cable systems[C]. International Council on Large Electric Systems, Paris, France, 2000: 2-3.

[5] Delpino S, Fabiani D, Montanari G C, et al. The effect of temperature on space charge accumulated at chemical and physical interfaces of HVDC polymeric insulation systems[C]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2007: 498-501.

[6] 吕亮，王霞，何华琴，等．硅橡胶 / 三元乙丙橡胶界面上空间电荷的形成 [J]．中国电机工程学报，2007，27(15)：106-109．

Lv Liang, Wang Xia, He Huaqin, et al.Formation of space charges at interface between ethylene propylene dieneterpolymer and silicone rubber [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 106-109.

[7] Rose A. Space-charge-limited currents in solids[J]. Physical Review, 1955, 97(6): 1538.

[8] Lampert M A. Simplified theory of space-charge-limited currents in an insulator with traps[J]. Physical Review, 1956, 103(6): 1648.

[9] 冯慈璋，马西奎．工程电磁场导论 [M]．北京：高等教育出版社，2000．

[10] McNaught A D. Compendium of chemical terminology[M]. Oxford: Blackwell Science, 1997.

[11] 高观志，黄维，雷清泉．固体中的电输运 [M]．北京：科学出版社，1991．

[12] Wang Y, Wu J, Yin Y. Space charge behavior in low density polyethylene at low temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3860-3868.

（上接第 70 页）

[14] Tavernier K, Auckland D W, Varlow B R. Improvement in the electrical performance of electrical insulation by non-linear fillers[C]. IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998: 533-538.

[15] Alam S, Serdyuk Y V, Gubanski S M. Potential decay on silicone rubber surfaces affected by bulk and surface conductivities[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 970-978.

[16] Min D, Cho M, Khan A R, et al. Surface and volume charge transport properties of polyimide revealed by surface potential decay with genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 600-608.

[17] Gildenblat G S, Rao A R, Cohen S S. Space-charge-limited currents in materials with nonlinear velocity-field relationships[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1987, 34(10): 2165-2172.

[18] Castellon J, Nguyen H N, Agnel S, et al. Electrical properties analysis of micro and nano composite epoxy resin materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 651-658.

[19] Du B X, Liang H C, Li J, et al. Temperature dependent surface potential decay and flashover characteristics of epoxy/SiC composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 631-638.